

## Übung 3: Elektrische Schaltungen 2

### Allgemeines zur Durchführung der Übung

#### Vor der Übung:

- Machen Sie sich mit Kapitel 10.2 sowie der RC-Schaltung aus Bsp. A 10.11 und A 10.12 aus *Grundlagen der Elektrotechnik 1* und der Ladungspumpe (Abb. 2) vertraut (evt. eine Kopie für das Protokoll anfertigen).
- Führen Sie Berechnungen, soweit möglich, vor der Laborübung durch.  
Wie hängen beim RC bzw. beim CR-Glied  $U_A$  und  $U_E$  bei hohen Frequenzen voneinander ab? Wie hängen sie bei niedrigen Frequenzen voneinander ab? Hinweis: Lösen Sie Bsp. A 10.11 und A 10.12. Charakterisieren Sie die Spannung  $U_A(U_E)$  nach integrierendem / differenzierendem Verhalten, Hochpass / Tiefpass<sup>1</sup>.
- Machen Sie sich mit der 5/8 Methode zur Messung der Zeitkonstante vertraut.

**Bei der Übung:** Bauen Sie die Schaltungen auf, ohne die Spannungsquellen einzuschalten. Überprüfen Sie vor Einschalten der Quellen nochmals die Schaltung, insbesondere folgende Punkte:

- Kabel
  - Achten Sie auf eine saubere Kabelführung. Verwenden Sie, soweit möglich, kurze Kabel und vermeiden Sie ineinander verschlungene Kabel um das Rauschen der Signale zu reduzieren.
- Frequenzgenerator
  - Die Spannungsanzeige des Frequenzgenerators bezieht sich je nach Einstellung auf einen offenen oder mit  $50\ \Omega$  abgeschlossenen Ausgang und ist somit nur ein Anhaltspunkt. → Spannung mit z.B. Oszilloskop nachmessen.
- Oszilloskop
  - Ist der Tastkopf richtig kalibriert? (siehe Auszug aus den Bedienungshandbüchern Teil 4, S. 5)
  - Falls Sie die X-Y Darstellung oder den Math-Kanal des Oszilloskops verwenden, müssen beide Kanäle (Ch1, Ch2) dieselbe Skalierung aufweisen. Prüfen Sie in diesem Zusammenhang:
  - Sind die Tastköpfe auf 1x oder 10x Verstärkung eingestellt?
  - Ist bei den Kanälen des Oszilloskops 1x oder 10x Verstärkung eingestellt ?
  - Ist die Masse richtig angeschlossen? – Achtung vor Kurzschlüssen in der Schaltung über die Oszilloskopmasse!
  - Verwenden Sie die Funktion zur Mittelwertbildung um Rauschen zu unterdrücken. (siehe Auszug aus den Bedienungshandbüchern Teil 4, S. 55)
- Multimeter
  - Werden die richtigen Eingänge für die Strom- bzw. Spannungsmessung verwendet?
  - Ist der Messbereich richtig eingestellt (z.B. AC/DC)?

---

<sup>1</sup>Hochpass: Filter, das nur hohe Frequenzen ungeschwächt passieren lässt. Tiefpass: Filter, das nur tiefe Frequenzen ungeschwächt passieren lässt.

- Bauteile
  - Maximal zulässige Verlustleistung der verwendeten Potentiometer:  $P_{\max} = 0,25 \text{ W}$
  - Maximal zulässiger Strom der verwendeten Diode (1N4148):  
 $I_{F,\max} = 300 \text{ mA}$  (Strombegrenzung durch Vorwiderstand bzw. durch Strombegrenzung der Spannungsquelle).
  - Bauteile vor Verwendung mit Multimeter auf Funktion überprüfen und defekte Bauteile bzw. defekte Kabel dem Übungsleiter übergeben.

Fertigen Sie ein Laborprotokoll an und beachten Sie folgende Punkte:

1. Halten Sie Ihre Ergebnisse in einem Laborprotokoll fest! Das Protokoll soll Ihre Ergebnisse *nachvollziehbar* beinhalten!
2. Achten Sie bei sämtlichen Skizzen auf eine korrekte und aussagekräftige Achsenbeschriftung!
3. Beantworten Sie ebenfalls die in diesem Skriptum zu den Übungsaufgaben gestellten Fragen in Stichworten im Protokoll!

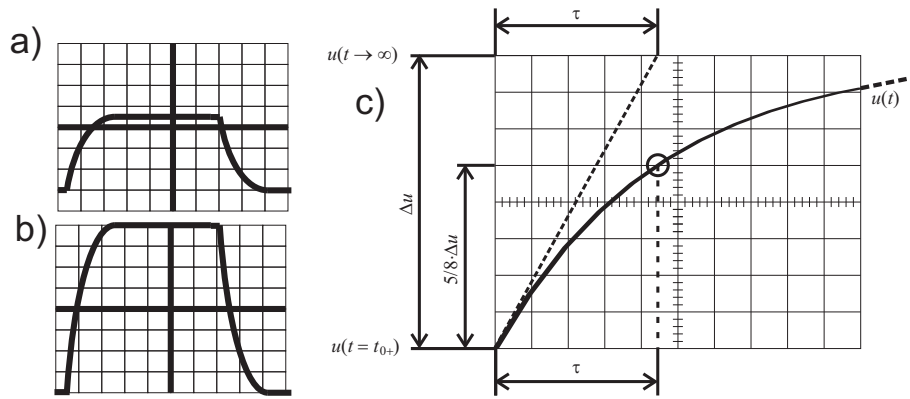
## Teil 1: Einfache RC-Schaltungen

### RC-Glied

- Bauen Sie ein RC-Glied gemäß Beispiel A 10.12 aus A. Prechtl, *Grundlagen der Elektrotechnik 1*. Wählen Sie  $C = 2,2 \mu\text{F}$  und  $R$  gemäß einer Zeitkonstanten von  $\tau = R \cdot C = 1 \text{ ms}$ . Legen Sie nun eine Rechteckspannung an. Wählen Sie die Frequenz so, dass der Lade/-Entladevorgang des Kondensators "abgeschlossen" ist. Notieren Sie die gewählte Frequenz im Protokoll.
- Messen Sie die Zeitkonstante mit der 5/8-Methode (siehe nächster Abschnitt).
- Stellen Sie nun im Menü *CH1* bzw. *CH2* die Option *Volts/Div* wieder auf *grob*.
- Beobachten Sie Eingangs- und Kondensatorspannung für ein Verhältnis Zeitkonstante zu Periodendauer ( $\tau/T$ ) von  $\frac{1}{100}$ ,  $\frac{1}{10}$ ,  $\frac{1}{2}$ , 1 und 5.
- Erklären Sie stichwortartig das beobachtete Verhalten der Ausgangsspannung. Wann kann man von integrierendem Verhalten der Schaltung sprechen? Wann kann man von einem Tiefpass sprechen? **KEINE Ausdrücke des Schirmbildes des Oszilloskops!! Papier sparen!!**
- Verifizieren Sie bei geeignet gewählter Frequenz dieses integrierende Verhalten auch für eine Dreieck- und für eine Sinusspannung am Eingang. **Je ein Ausdruck des Schirmbildes des Oszilloskops, d.h in Summe 2 Ausdrücke!**

### CR-Glied

- Bauen Sie ein CR-Glied gemäß Beispiel A 10.11 aus A. Prechtl, *Grundlagen der Elektrotechnik 1*, indem Sie die Versorgungsspannung des RC Gliedes am Steckbrett umstecken. Achtung vor Kurzschlüssen in der Schaltung über die Oszilloskopmasse!
- Legen Sie nun eine Rechteckspannung an den Eingang und beobachten Sie Eingangs- und Ausgangsspannung für ein Verhältnis Zeitkonstante zu Periodendauer ( $\tau/T$ ) von  $\frac{1}{100}$ ,  $\frac{1}{10}$ ,  $\frac{1}{2}$ , 1 und 5.
- Erklären Sie stichwortartig das beobachtete Verhalten der Ausgangsspannung. Wann kann man von differenzierendem Verhalten der Schaltung sprechen? Wann kann man von einem Hochpass sprechen? **KEINE Ausdrücke des Schirmbildes des Oszilloskops!! Papier sparen!!**
- Verifizieren Sie bei geeignet gewählter Frequenz dieses differenzierende Verhalten auch für eine Dreieck- bzw. Sinusspannung am Eingang. **Je ein Ausdruck des Schirmbildes des Oszilloskops, d.h in Summe 2 Ausdrücke!**



**Abbildung 1:** Messung der Zeitkonstante mit Hilfe des Oszilloskops nach der 5/8-Methode. Voraussetzung ist ein exponentieller Spannungsverlauf.

## Die 5/8-Methode zur Messung der Zeitkonstante

Man lege an einen Kondensator eine Rechteckspannung mit so geringer Frequenz an, dass der Lade- bzw. Entladevorgang innerhalb einer halben Periode "abgeschlossen" ist. Damit liegt unmittelbar vor jeder steigenden bzw. fallenden Flanke der Rechteckspannung ein quasi stationärer Zustand vor ( $i_C \approx 0$ ). Die steigende bzw. fallende Flanke der Rechteckspannung entspricht somit dem Anlegen eines Spannungssprungs, und wir betrachten folgendes Bild: An eine Schaltung mit anfangs ungeladenem Kondensator ( $u_C(t = 0-) = u_C(t = 0+) = 0\text{V}$ ), entsprechend Abb. 10.12. a <sup>1</sup>, wird zum Zeitpunkt  $t_0 = 0\text{ s}$  ein Spannungssprung  $U_0$  angelegt. In Folge ergibt sich ein Spannungsverlauf am Kondensator gemäß

$$u_C(t) = U_0(1 - e^{-t/\tau}) \quad , \quad t \geq 0. \quad (1)$$

Dabei bedeutet  $\tau = RC$  die Zeitkonstante der Schaltung,  $R$  ist der von den Kondensatorklemmen aus betrachtete Widerstand der Schaltung.

Die Spannung  $u_C(t)$  beträgt nach einer Zeitspanne  $\tau$ , d.h.  $t = \tau$ , in Abhängigkeit vom stationären Endwert  $U_0$

$$u_C(\tau) = U_0(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau}}) = U_0(1 - e^{-1}). \quad (2)$$

Mit der Näherung  $e^{-1} \approx \frac{3}{8}$  ermittelt man  $\tau'$ , und es gilt:

$$u_C(\tau') = U_0(1 - e^{-\frac{\tau'}{\tau}}) = U_0(1 - \frac{3}{8}) \quad (3)$$

$$e^{-\frac{\tau'}{\tau}} = \frac{3}{8} \Rightarrow \frac{-\tau'}{\tau} = \ln \frac{3}{8} \Rightarrow \tau' = -\tau \ln \frac{3}{8} \approx \tau \quad (4)$$

Diesen Zusammenhang kann man benutzen, um mit dem Oszilloskop auf einfache Weise die Zeitkonstante  $\tau$  zu bestimmen. Der Oszilloskopschirm ist horizontal durch Rasterlinien in acht Abschnitte unterteilt, daraus kann nach Abb. 1 die Zeitkonstante bestimmt werden. Gehen Sie folgendermaßen vor:

1. Zeitbasis und Amplitudenskalierung des Oszilloskops so wählen, dass Start- und Endwert des Ausgleichsvorganges sowie die gesamte Amplitude am Schirm sichtbar sind (Abb. 1 a).
2. Amplitudenskalierung des Oszilloskops nun soweit verändern, dass das Spannungsminimum den unteren und das Spannungsmaximum den oberen Rand des Rasters am Oszilloskop berühren (Abb. 1 b). Dazu muss im Menü *CH1* bzw. *CH2* die Option *Volts/Div* auf *fein* gestellt werden.
3. Mittels Cursor-Messung am Oszilloskop,  $\tau$  folgendermaßen bestimmen: Es werden zwei Zeit-Cursor verwendet. Der linke Cursor wird am Startzeitpunkt des Ausgleichsvorganges positioniert, und der zweite Cursor wird am Schnittpunkt mit der 5/8-Rasterlinie positioniert (Abb. 1 c). Um eine bessere zeitliche Auflösung zu erhalten, kann die Zeitbasis verändert werden.
4. Die Zeitkonstante kann nun als Zeitintervall zwischen linkem und rechtem Cursor abgelesen werden.

<sup>1</sup>aus *Grundlagen der Elektrotechnik 1*

## Teil 2: Ladungspumpe

Diese Schaltung (siehe Abb. 2) kann verwendet werden, um eine Gleichspannung ( $U_{in}$ ) auf andere Werte "umzusetzen", wobei die Ausgangsspannung höher als die Eingangsspannung sein (Verstärkung) oder andere Polarität (Umpolung) haben kann. Im Gegensatz zu sog. Schaltreglern, welche bei höheren Leistungen verwendet werden, benötigt die Ladungspumpe keine Spulen, was die Schaltung einfach, klein und billig macht. Ein Nachteil ist die geringe Strombelastbarkeit. Ladungspumpen können daher nur eingesetzt werden, wenn die Stromaufnahme, in Abhängigkeit von der Last, entsprechend gering ist. Eine typische Anwendung wäre z.B. die Versorgung eines Operationsverstärkers auf einem Mikrocontrollerboard mit einer bipolaren Spannung (+5V, -5V), wenn nur +5V zur Verfügung stehen.

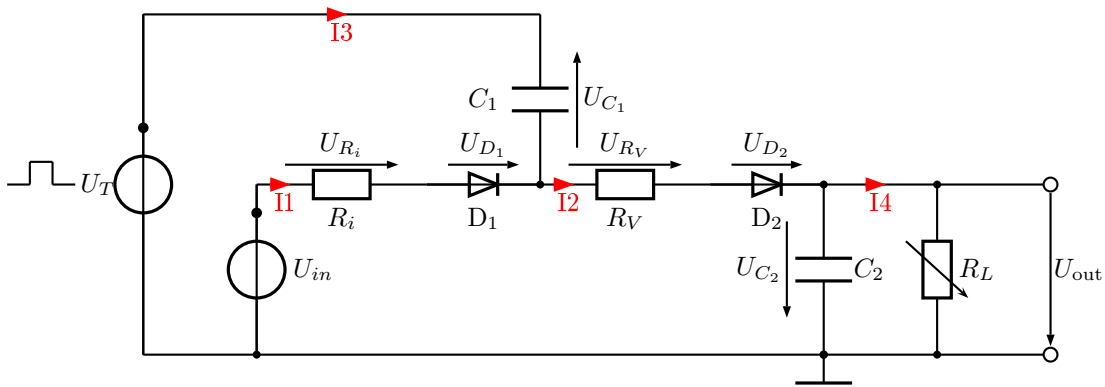


Abbildung 2: Ladungspumpe

Zur Funktion:

Wir unterscheiden die erste Phase der Taktspannung mit Amplitude  $U_{T1}$  und die zweite Phase mit Amplitude  $U_{T2}$ , wobei  $U_{T1} < U_{T2}$ .

Phase 1:  $U_T = U_{T1} = 0V$ :  $D_1$  leitet,  $D_2$  sperrt (Abb.3: ). Es fällt an der Diode  $D_1$  die Spannung  $U_{D1} = U_F$  ab, wobei  $U_F$  die Flussspannung<sup>2</sup> der Diode ist. Der Kondensator  $C_1$  wird unmittelbar auf die Spannung  $U_{C1} = U_{in} - U_F - U_{T1}$  geladen.

Phase 2:  $U_T = U_{T2}$ :  $D_1$  sperrt,  $D_2$  leitet ( $U_{D2} = U_F$ ) (Abb. 4:  $U_{T2} = 5V$ ).  $C_1$  ist von  $U_{in}$  getrennt und in Reihe zu  $C_2$  geschaltet. Auf  $C_1$  gespeicherte Ladung wird zum Teil auf  $C_2$  geschoben.

$R_L \rightarrow \infty$ : Unter der Voraussetzung, dass der Lastwiderstand sehr groß<sup>3</sup> ist, folgt  $I_4 = 0$  für Phase 1 und Phase 2,  $C_2$  wird also nie entladen. Im Einschwingvorgang wird daher die Ladung auf  $C_2$  mit jedem Taktzyklus in Phase 2 erhöht. Nach einigen Taktzyklen ist der eingeschwungene Zustand erreicht:

Die Ladung auf  $C_2$  bleibt nun in erster Näherung konstant, daher auch die Spannung  $U_{C2}$ . Gleiches gilt für die Ladung auf  $C_1$  und die Spannung  $U_{C1}$ . In erster Näherung folgt für alle Ströme  $I \rightarrow +0$  und somit  $U_{Rv} \rightarrow +0$  und  $U_{Ri} \rightarrow +0$ . Die Fallunterscheidung

1.  $U_T = U_{T1}$ :  $D_1$  leitet ( $U_{D1} = U_F$ ),  $D_2$  sperrt
2.  $U_T = U_{T2}$ :  $D_1$  sperrt,  $D_2$  leitet ( $U_{D2} = U_F$ )

liefert ein Gleichungssystem aus dem folgt: am Ausgang stellt sich im eingeschwungenen Zustand für  $R_L \rightarrow \infty$  eine konstante maximale Spannung

$$U_{out} = U_{C2} = U_{T2} + U_{C1} - U_{D2} = (U_{T2} - U_{T1}) + U_{in} - 2 \cdot U_F \quad (5)$$

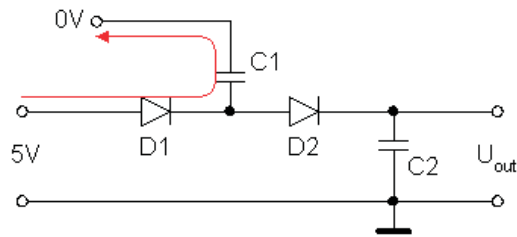
ein.

$R_L < \infty$ : Während der Phase 1 wird die Ladung auf  $C_2$  nur annähernd erhalten und in Phase 2 wird in Folge Ladung von  $C_1$  auf  $C_2$  und zur Last geschoben. Die Ströme sind nicht 0 die mittlere Ausgangsspannung sinkt je nach Last unter den Wert des Idealfalles (siehe Gleichung 5).

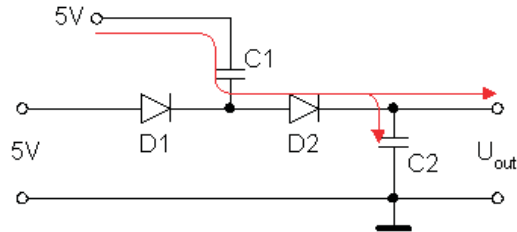
Eine praktische Ausführung dieses Prinzip ist als integrierte Schaltung von verschiedenen Herstellern erhältlich (z.B. Maxim MAX680).

<sup>2</sup>Flussspannung = Schwellspannung

<sup>3</sup> $f_T \gg 1/(R_{Last} C_2)$



**Abbildung 3:** Während der ersten Periodenhälfte der Taktspannung (Phase 1) ist  $U_T = 0$  V. Die Diode  $D_1$  leitet,  $D_2$  sperrt. Ladung wird von der Quelle auf  $C_1$  übernommen.



**Abbildung 4:** Während der zweiten Periodenhälfte der Taktspannung (Phase 2) ist  $U_T = 5$  V und  $D_1$  sperrt während  $D_2$  leitet. Ladung wird von  $C_1$  auf  $C_2$  (und im Fall  $R_L < \infty$  zur Last) weitergeschoben.

### Übungsdurchführung

- Bauen Sie entsprechend Abb. 2 eine Ladungspumpe mit  $C_{1,2} \gtrsim 2,2\mu\text{F}$  **ohne** Lastwiderstand  $R_L$  auf.  $R_i$  bezeichnet den Innenwiderstand der Spannungsquelle.
- Verwenden Sie für  $U_{\text{in}}$  eine Gleichspannungsquelle. Für die Taktspannung  $U_T$  benutzen Sie den Funktionsgenerator (Rechteckschwingung mit  $f = 1$  kHz).
- Um die Diode  $D_1$  nicht zu überlasten, wählen Sie bei  $U_{\text{in}}$  eine Strombegrenzung von 300mA. Um die Diode  $D_2$  nicht zu überlasten, schalten Sie einen Vorwiderstand  $R_V$  vor. Die größte Strombelastung der Diode besteht im 1. Taktzyklus des Einschwingvorganges. Am Widerstand  $R_V$  liegt dann eine Spannung bis zu  $U_{R_V} = \Delta U_T = (U_{T2} - U_{T1})$ . Dimensionieren Sie den Widerstand entsprechend.
- Stellen Sie am Oszilloskop  $U_T$  und  $U_{\text{out}}$  dar. Verwenden Sie die *Measure* Funktion um U-Spitze-Spitze ( $U_{\text{SS}}$ ) von  $U_T$ , und um Maximum ( $U_{\text{max}}$ ) sowie Minimum ( $U_{\text{min}}$ ) von  $U_{\text{out}}$  zu überwachen.
- Verstärkung: Variieren Sie die Taktspannung  $U_T$  und die Gleichspannung  $U_{\text{in}}$ . Listen Sie für 3 beliebig gewählte Wertepaare von  $U_T$  und  $U_{\text{in}}$ :  $\Delta U_T$ ,  $U_{\text{in}}$  und  $U_{\text{out}}$  auf (Tabelle ins Protokoll). Vergleichen Sie diese Werte mit (Gleichung 5). Hinweis:  $U_{\text{SS}}$  von  $U_T$  entspricht  $\Delta U_T = (U_{T2} - U_{T1})$ .
- Umpolung: Legen Sie die Taktspannung in den negativen Bereich indem Sie einen negativen Gleichanteil hinzufügen. Setzen Sie die Eingangsspannung (Gleichspannungsquelle) auf 0 Volt. Was beobachten Sie am Ausgang?